

XVI ERIAC
DECIMOSEXTO ENCUENTRO
REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ

17 al 21 de mayo de 2015



A1-07

Comité de Estudio A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas

SISTEMA DE MONITORAMENTO INTENSIVO DE DESCARGAS PARCIAIS EM HIDROGERADORES

A. T. CARVALHO*	H. P. AMORIM	A. C. N. PARDAUIL
CEPEL	CEPEL	CEPEL/UFPA
Brasil	Brasil	Brasil

D. S. CARVALHO	F. S. BRASIL	P. R. M. VILHENA
Eletronorte	Eletronorte	Eletronorte
Brasil	Brasil	Brasil

Resumo *– O presente trabalho apresenta a concepção e a implementação de um inovador sistema de monitoramento intensivo de descargas parciais aplicado a máquinas rotativas. O sistema proposto, desenvolvido pelo Cepel em parceria com a Eletronorte, baseia-se no conceito de instrumentação modular, sendo uma solução conciliadora entre as alternativas de monitoramento contínuo e de medições esporádicas realizadas para o diagnóstico preditivo da isolação de estatores. A alternativa do monitoramento intensivo, conjugada com medições esporádicas, representa uma substancial redução global de custos de monitoramento e um avanço nas técnicas de medição e de avaliação dielétrica. Resultados da instalação e da utilização do sistema em usinas hidrelétricas da Eletronorte são apresentados e discutidos.*

Palavras chave: Descargas Parciais – Monitoramento Intensivo – Medição *Online* – Diagnóstico Preditivo – Isolação – Hidrogeradores

1 INTRODUÇÃO

A avaliação do dielétrico em máquinas síncronas de tensão nominal superior a 6 kV pode ser realizada por meio de três ensaios principais: a medição da resistência da isolação, a medição do fator de perdas e a medição de Descargas Parciais (DP) [1-6]. Destes três métodos, a medição de DP, além de apresentar maior sensibilidade e possibilitar a localização dos pontos de maior fragilidade no sistema de isolação, é a única técnica que pode ser empregada on-line, isto é, durante a operação normal da máquina [3].

A medição *online* requer a instalação permanente de sensores de DP, e apresenta diversas vantagens em relação a medições *offline*, sobretudo por possibilitar a realização da medição de DP nas reais condições de operação do equipamento e de solicitação do dielétrico. Outras vantagens são a maior rapidez e o menor custo por ensaios realizados, a não retirada de operação dos equipamentos, etc [5].

Medições *online* de DP podem ser realizadas periódica ou continuamente [6]. Em medições periódicas o sistema de medição deve ser portátil, conduzido esporadicamente até os terminais de acesso dos sensores de DP para realização dos ensaios. Por outro lado, no monitoramento contínuo, um sistema de medição dedicado deve monitorar em tempo real as condições do sistema de isolação do estator. Nesse caso, eventuais alterações nestas condições podem ser identificadas e avaliadas em seu estado inicial, permitindo o seu diagnóstico preditivo e a determinação das estratégias de manutenção mais convenientes.

Embora o monitoramento contínuo apresente evidentes vantagens de diagnóstico, na prática, a instalação de sistemas dedicados para cada máquina é frequentemente descartada ou postergada pelos seus elevados custos. Além do mais, em equipamentos por assim dizer saudáveis, onde as condições de operação

* Contato: tomaz@cepel.br

permanecem estáveis e em níveis aceitáveis, o monitoramento contínuo se mostra desnecessário, não produzindo novas informações relevantes.

O presente trabalho propõe a conjugação destas duas estratégias de medição (periódica e contínua) através de um sistema de monitoramento intensivo, instalado temporariamente para o monitoramento contínuo de máquinas com detectada atividade de DP, as quais requerem maior atenção quanto à evolução dos processos de deterioração do dielétrico.

Com a identificação da necessidade de um sistema de monitoramento intensivo, foram levantados os requisitos essenciais para o novo sistema de medição, bem como suas vantagens e limitações em relação aos sistemas portátil e permanente. Um protótipo foi desenvolvido e testado em laboratório e no campo.

Como estudo de caso, apresentamos a experiência conjunta do Cepel e da Eletronorte na utilização do sistema IMA-DP Intensivo, concebido, desenvolvido e aplicado ao monitoramento intensivo de hidrogeradores de grande porte.

O restante do trabalho é organizado da seguinte forma: na Seção 2 elencaremos os requisitos necessários para um sistema digital de medição de DP, utilizados como parâmetros na elaboração do sistema proposto. Na Seção 3 apresentaremos as soluções propostas para a medição e o monitoramento de DP utilizando instrumentação modular, incluindo o sistema de monitoramento intensivo. Na Seção 4 apresentaremos resultados da instalação e utilização deste sistema na Eletronorte, e na Seção 5 apresentaremos conclusões e considerações finais.

2 SISTEMAS DIGITAIS DE MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

Segundo Lemke et al [1], o estado da técnica em sistemas digitais de medição de DP apresenta a estrutura mostrada na Fig. 1.

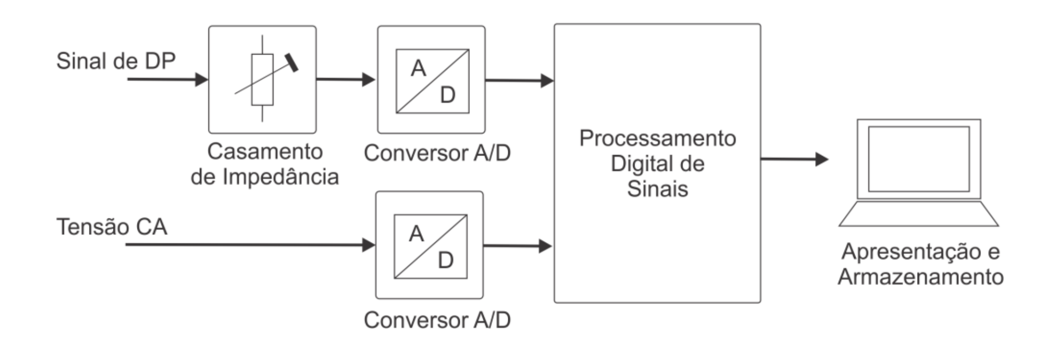


Fig. 1. Esquema de um sistema de medição digital de DP.

Conforme a Fig. 1, um sistema de medição digital recebe dois sinais de entrada: o sinal de DP, oriundo diretamente do circuito de medição, e um sinal correspondente à tensão de ensaio aplicada ao objeto, que no caso do monitoramento *online* corresponde à própria tensão de operação da máquina ensaiada. Essencialmente, um sistema de medição de DP deverá registrar, para cada pulso: sua amplitude, o instante ou o ângulo de fase de sua ocorrência (em relação à tensão aplicada) e o valor da tensão aplicada neste instante. O sinal de DP, após passar por um circuito analógico destinado ao casamento de impedâncias, será digitalizado simultaneamente com o sinal da tensão aplicada.

Em seguida, a etapa de processamento digital dos sinais, em substituição aos tradicionais circuitos analógicos utilizados na medição de DP, realiza as operações de filtragem de acordo com a banda de medição selecionada e a detecção de pico para a medição da amplitude das DP. Além do mais, na etapa de processamento de sinais, a forma de onda dos pulsos de DP pode ser registrada e processada. É nessa etapa, portanto, onde algoritmos de supressão de ruído e de classificação dos pulsos são implementados. Para o processamento digital dos pulsos de DP faz-se necessária uma grande velocidade de processamento, atingida em muitos casos pela implementação dos algoritmos de processamento diretamente em hardware, em dispositivos FPGA [1].

Finalmente, o produto da etapa de processamento dos sinais é passado ao computador, onde os resultados são apresentados e registrados na forma de mapas *Phase Resolved Partial Dischages* (PRPD).

3 INSTRUMENTAÇÃO MODULAR

Um sistema de Instrumentação Modular, por definição, utiliza componentes compartilhados e um software definido pelo usuário para satisfazer a necessidades específicas de medição [9]. A partir de módulos funcionais genéricos, instrumentos específicos podem ser desenvolvidos beneficiando-se das tecnologias dos computadores comerciais, com dimensões reduzidas, menores custos e total flexibilidade.

No caso da medição de DP, os componentes do hardware de medição possivelmente compreenderão, além da CPU: digitalizadores de alta velocidade, unidades de processamento em FPGA, analisadores de espectro, comutadores de sinais e portas de conexão aos sistemas de supervisão dos equipamentos. O software de medição e processamento dos sinais, em substituição dos circuitos analógicos de processamento outrora utilizados para a medição de DP, constituirá a essência e o centro do sistema de medição baseado em instrumentação modular.

No escopo da medição *online* em máquinas rotativas, os sistemas de instrumentação modular podem destinar-se à medição ou à monitoração. Por definição, um sistema de medição é concebido para ser portado aos diversos equipamentos e realizar medições esporádicas de DP, atendendo a um cronograma de manutenção preditivo previamente planejado. Por outro lado, um sistema de monitoramento incorpora, além das funções de medição, a robustez e as características necessárias para ser instalado permanentemente junto aos equipamentos de alta tensão, realizando assim o monitoramento contínuo dos sinais de DP.

3.1 O Sistema IMA-DP

O sistema IMA-DP é resultado de décadas de estudo e experiência do Cepel na medição de DP e na avaliação dielétrica dos mais variados tipos de equipamentos de alta tensão. Baseado no conceito de instrumentação modular, o IMA-DP compreende a especificação de um hardware de medição compatível e de um software de processamento digital de sinais capaz de eliminar os diversos tipos de ruídos típicos em medições de DP, bem como filtrar, identificar e quantificar os sinais de DP úteis ao diagnóstico preditivo.

Beneficiando-se da flexibilidade dos sistemas de instrumentação modular, três configurações básicas foram propostas:

- IMA-DP Autônomo: como um sistema portátil de medição;
- IMA-DP Monitor: como um sistema fixo de monitoramento *online*;
- IMA-DP Intensivo: como um sistema de monitoramento móvel, capaz de ser deslocado entre os equipamentos mais críticos de uma instalação com o objetivo de realizar avaliações mais detalhadas da evolução das DP.

A seguir apresentaremos as características comuns às três configurações acima, bem como suas particularidades.

3.2 Características Gerais da Medição

Para a especificação geral do sistema IMA-DP as seguintes características da medição de DP foram adotadas:

- Conforme as características típicas dos sinais de DP medidos em máquinas síncronas, admitimos (com boa margem de segurança) que a faixa dinâmica de 20 V será suficiente para o registro de quaisquer sinais (isto é, admitiremos que os sinais medidos estarão sempre na faixa de -10 V a +10 V).
- Como requisito essencial do hardware de aquisição, este deve atender às especificações de um sistema de medição na banda HF, isto é, possuir largura de banda da ordem de 30 MHz com frequência de corte inferior em 1 MHz.

Para atender às especificações acima, o conversor A/D deverá atender à banda de medição especificada e, de acordo com o critério de Shannon-Nyquist [7], a taxa de aquisição do sistema de medição deverá ser superior a 60 MS/s. Selecionamos portanto, com alguma margem de segurança, a taxa de aquisição de 100 MS/s. Considerando a faixa dinâmica de 20 V, o número de bits do conversor A/D deverá ser tal que ainda nessa faixa tenhamos uma boa resolução vertical.

3.3 IMA-DP Monitor

Historicamente, o IMA-DP Monitor foi a primeira solução proposta (sua primeira versão entrou em operação no ano de 2004), desenvolvida pelo Cepel em parceria com a Eletronorte. Sua arquitetura de instrumentação modular se baseia na plataforma PXI.

PXI - *PCI eXtensions for Instrumentation* - é uma plataforma de computação industrial baseada em PC. O PXI combina características elétricas do barramento do PCI com o packaging modular Eurocard do CompactPCI, e adicionalmente inclui barramentos de sincronização especializados. Trata-se de uma plataforma de implementação de alto desempenho projetada para aplicações que exigem robustez e grande capacidade de processamento. Atualmente o PXI é um padrão industrial aberto administrado pelo PXI *Systems Alliance (PXISA)*, um grupo de mais de 70 empresas reunidas oficialmente para promover o padrão, garantir a interoperabilidade e manter a especificação PXI.

Os componentes de um sistema PXI podem ser divididos em: Chassis, Unidade Controladora e Instrumentação Modular. O IMA-DP Monitor adota como instrumentos modulares digitalizadores de alta velocidade e *Switches* de comutação de sinais, além de uma interface de comunicação RS-485 para conexão direta via rede industrial com o sistema supervisório das máquinas. O Software do IMA-DP Monitor realiza o monitoramento contínuo *online* das DP, alimentando um banco de dados integrado à rede corporativa da empresa. A Fig. 2 mostra uma foto de uma instalação do sistema configurada para aquisição de até 48 sinais de DP. Atualmente, o IMA-DP Monitor está instalado nas Usinas de Tucuruí e de Coaracy Nunes da Eletronorte.

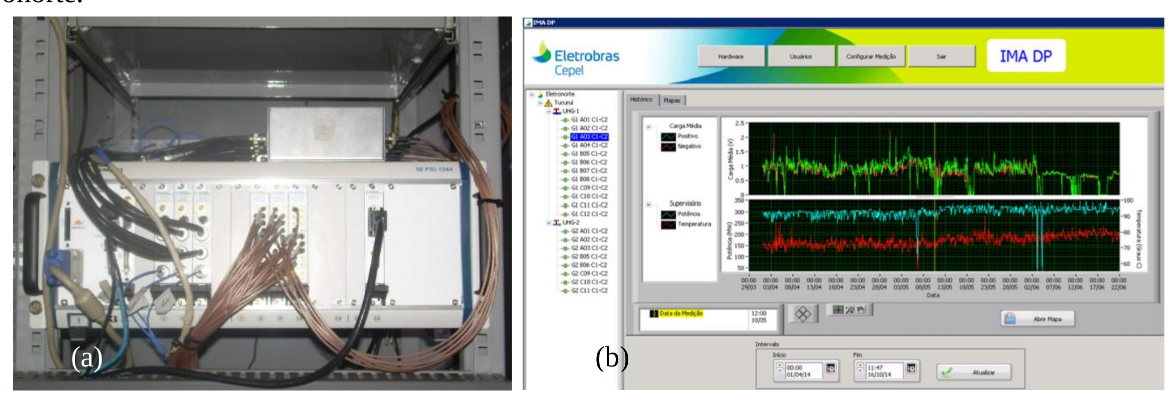


Fig. 2. a) Instalação do sistema IMA-DP Monitor para monitoração *online* de até 48 pontos de medição de DP. b) Curvas de tendência de DP e dos parâmetros de operação da máquina registradas com o sistema.

3.4 IMA-DP Autônomo

O IMA-DP Autônomo foi criado com o propósito de atender à demanda de medições *online* realizadas esporadicamente em máquinas rotativas com sensores permanentemente instalados. Sua proposta é uma alternativa de baixo custo à substituição de sistemas de medição obsoletos adquiridos pelas empresas. Sendo a solução mais econômica das três configurações, o IMA-DP Autônomo utiliza como arquitetura de instrumentação modular um digitalizador de alta velocidade conectado via porta USB a um computador laptop.

A Fig. 3 mostra o IMA-DP autônomo e a caixa de acesso aos terminais dos sinais de DP, onde são realizadas as medições periódicas. O resultado da avaliação pode ser visto na Fig. 4, onde os níveis de DP são mostrados por ponto de medição em uma máquina.



Fig. 3. a) Sistema IMA-DP Autônomo. b) Terminais de acesso aos sinais de DP em um hidrogerador.

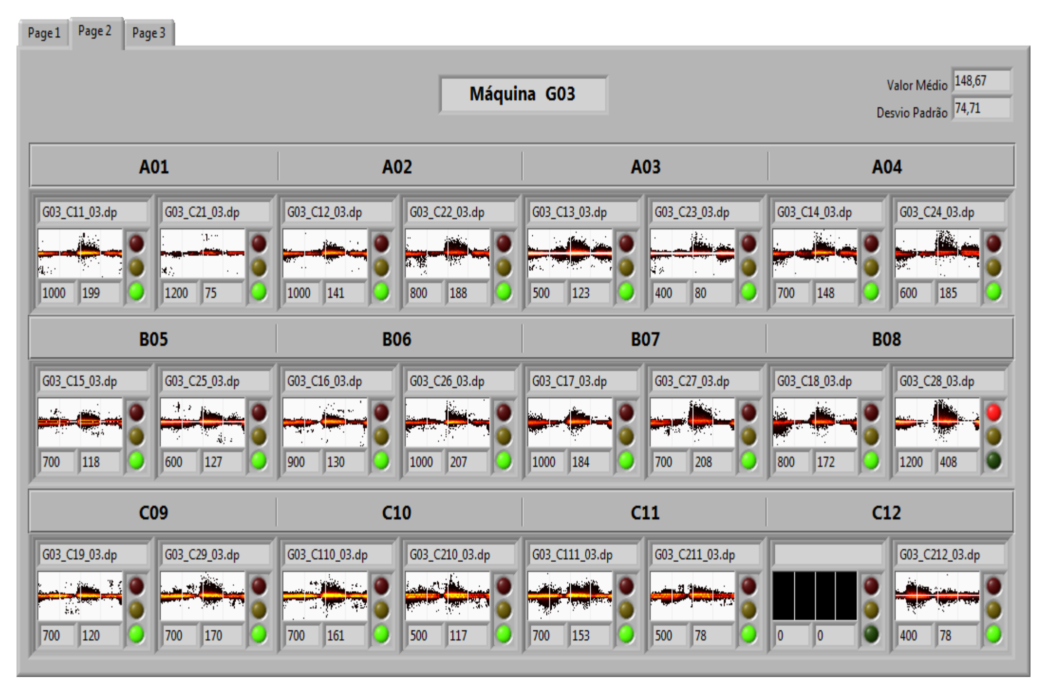


Fig. 4. Tela de avaliação das medições realizadas com o IMA-DP Autônomo.

3.5 IMA-DP Intensivo

A partir da experiência com o IMA-DP Monitor e dos resultados obtidos com o IMA-DP Autônomo, foi concebido o sistema IMA-DP Intensivo como um meio termo entre a solução do monitoramento contínuo e a medição autônoma e esporádica.

O IMA-DP Intensivo assemelha-se quanto ao hardware ao IMA-DP Monitor, utilizando como arquitetura de instrumentação modular a plataforma PXI. No entanto, o sistema foi concebido para poder ser alocado em diferentes máquinas, privilegiando aquelas cuja situação do dielétrico (previamente diagnosticada pelo IMA-DP Autônomo) requeira maior atenção e acompanhamento. Com relação ao software, portanto, o IMA-DP Intensivo assemelha-se ao IMA-DP Autônomo, não sendo conectado à rede corporativa da empresa nem à rede industrial dos sistemas supervisórios.

A arquitetura do IMA-DP Intensivo apresenta como vantagens:

- Maior simplicidade em relação ao sistema de monitoramento contínuo, em relação à instalação e operação;
- Mobilidade entre máquinas para priorizar as mais críticas;
- Independência de conexões à rede corporativa, à rede industrial da operação, ao sistema supervisório;
- Redução de custos em relação à instalação de sistemas de monitoramento permanente;
- Foco do monitoramento e diagnóstico concentrado na análise das máquinas que requeiram maiores cuidados.

Estritamente em relação ao hardware da instrumentação modular, os custos do sistema Intensivo são da mesma ordem de grandeza do sistema Monitor. Os custos globais do sistema IMA-DP Intensivo, no entanto, são reduzidos não só pela ausência da estrutura de instalação permanente e do cabeamento necessário, mas pela possibilidade de selecionar de antemão que máquinas deverão ser monitoradas e quais não necessitam de monitoramento contínuo, reduzindo assim o número de sistemas adquiridos. Entretanto o sistema apresenta como desvantagem, além de não ser conectado ao sistema supervisório, possuir uma instalação mais frágil e desprotegida, se comparada à instalação do IMA-DP Monitor.

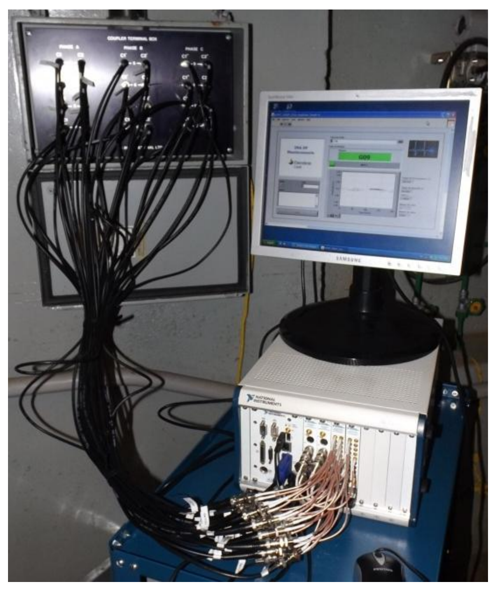


Fig. 5. Instalação do sistema IMA-DP Intensivo para o monitoramento temporário de um hidrogerador.

4 RESULTADOS

O sistema IMA-DP Intensivo encontra-se em operação na Usina de Tucuruí desde outubro de 2014. O monitoramento das unidades hidrogeradoras com maiores atividades de DP tem possibilitado o aumento do conhecimento do processo de degradação do dielétrico nas máquinas, bem como uma maior compreensão do fenômeno físico e de suas implicações para a saúde do dielétrico.

A Fig. 6 mostra o resultado de medições realizadas nas três fases de uma unidade hidrogeradora. A Fig. 7 apresenta ainda as curvas de tendência com a evolução dos níveis de DP durante a operação da máquina.

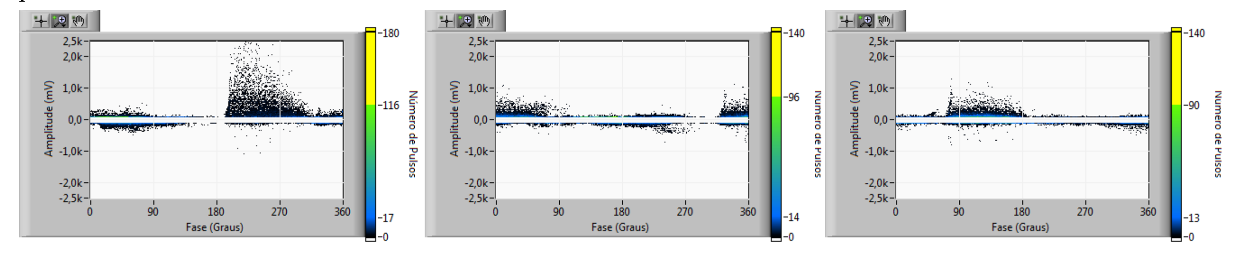


Fig. 6. Exemplos de Padrões de DP registrados pelo sistema IMA-DP Intensivo nas três fases da máquina.

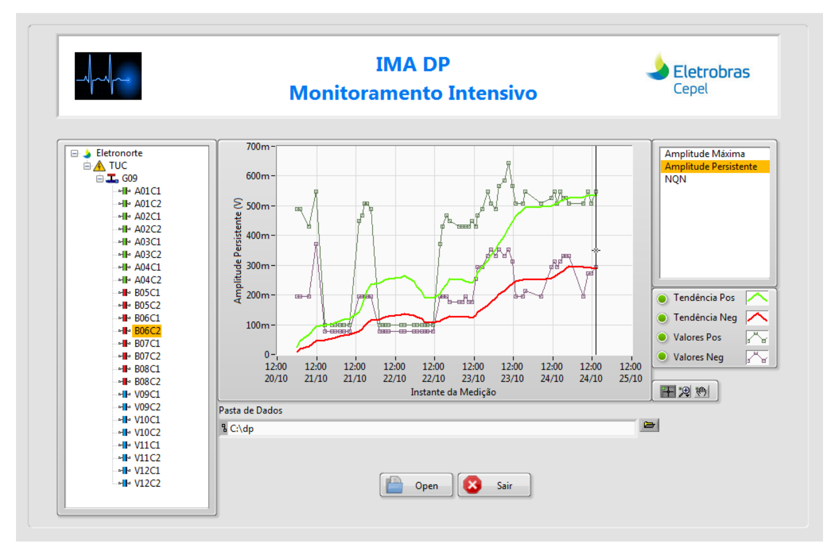


Fig. 7. Curvas de tendência de DP adquiridas pelo IMA-DP Intensivo.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do IMA-DP em suas três configurações teve por motivação, desde a sua concepção e ao longo do amadurecimento de suas funcionalidades, os seguintes aspectos:

- Propiciar uma análise mais detalhada do comportamento das descargas parciais em cada instalação de tal modo e se ajustar o sistema de medição para a sensibilidade melhor possível;
- Reduzir os custos dos sistemas de monitoramento de tal forma que seja viável sua instalação em um grande número de unidades geradoras e pontos de acopladores;
- Flexibilizar o custo total do sistema em função do interesse específico em se monitorar mais intensamente algumas unidades em detrimento de outras. A filosofia de sistemas modulares permite que se façam arranjos dinâmicos ao longo do tempo sem alterações do software que gerencia os instrumentos e daquele que analisa os dados armazenados. Isso possibilita reorganizar os módulos de aquisição entre os diferentes geradores de uma determinada usina;
- Reduzir os custos envolvidos na atualização de software e hardware e os custos com a manutenção dos sistemas;
- Facilitar a introdução contínua de ferramentas de análise e diagnóstico aproveitando-se de toda estrutura do banco de dados que é obtido ao longo do tempo;
- Nacionalizar os estágios de monitoramento, formatação da informação, análise das DP e diagnóstico das máquinas criando assim conhecimento e potencial de análise em cada empresa que seja suficiente para decisões de manutenção desse tipo de instalação;
- Facilitar e agilizar os processos de medição de DP nas usinas pelo pessoal da manutenção e, consequentemente, tornar mais dinâmico e rápido o diagnóstico do isolamento estatórico;
- Relacionar, onde cabível, o comportamento das descargas parciais com outras grandezas monitoradas por diferentes sistemas.

Pelos resultados obtidos até o momento na utilização do IMA-DP, e particularmente com a inovação do sistema IMA-DP Intensivo, os objetivos supracitados estão sendo plenamente alcançados. O sistema apresenta avanços significativos na tecnologia de monitoramento e diagnóstico preditivo de máquinas rotativas, com significativa redução de custos, adaptando e aplicando a equipamentos elétricos de alta tensão conceitos tradicionalmente utilizados em medicina diagnóstica como o monitoramento temporário de pacientes [8].

6 REFERÊNCIAS

[1] LEMKE, E. WG D1.33 Guide for Partial Discharge Measurements in Compliance to IEC 60270. Relatorio tecnico, Cigre, 2008.

[2] IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery", IEEE Std 1434-2000, 2000.

[3] IEEE Draft Guide for Online Monitoring of Large Synchronous Generators -10 MVA and above", IEEE P1129 D9, pp. 1

[4] Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus – Electrical Machinery", IEEE Std 62, pp. 1.

[5] IEC 60034-27 Rotating electrical machines - On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines", 2007.

[6] IEC 60034-27-2 Rotating electrical machines - On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines", 2012.

[7] Carvalho, A. T. , "Seleção de Bases Wavelet para a Redução do Ruído de Banda Larga em Medições de Descargas Parciais em Máquinas Síncronas". Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2014.

[8] Website: "http://www.portaleducacao.com.br/enfermagem/artigos/7602/monitorizacao-hemodinamica" acessado em 07/11/2014.

[9] Website: http://www.ni.com/modularinstruments/whatis/pt/ acessado em 07/11/2014.